

Procédé de fabrication d'un produit corroyé à haute résistance en alliage AlZnMgCu

5 Arrière-plan de l'invention

- Domaine de l'invention

L'invention concerne la fabrication de produits corroyés par laminage, filage ou forgeage en alliage d'aluminium du type AlZnMgCu à haute résistance mécanique, utilisés notamment dans la construction aéronautique, en particulier pour les extrados d'ailes d'avions.

- Art antérieur

15 Les alliages du type Al-Zn-Mg-Cu sont utilisés depuis plus de 50 ans dans la construction aéronautique, et notamment pour les extrados d'ailes. On a utilisé ainsi les alliages 7075, 7178, 7050, 7150 et, plus récemment les alliages 7055 et 7449. Ces alliages ont été le plus souvent utilisés à l'état T6, c'est-à-dire à un revenu correspondant au maximum de la limite d'élasticité en traction, ou à un état sur-
20 revenu T76, T79 ou T77 pour obtenir une meilleure résistance à la corrosion. A titre d'illustration de cet état de la technique, on peut citer les brevets EP 0020505 de Boeing relatif à l'alliage 7150, les brevets US 4,477,292, US 4,832,758, US 4,863,528 et US 5,108,520 d'Alcoa sur le traitement T77, le brevet EP 0377779 d'Alcoa relatif à un procédé de fabrication de l'alliage 7055, et la demande de brevet
25 EP 0670377 de la demanderesse décrivant un procédé de fabrication de tôles en alliage 7449.

Les propriétés de l'alliage 7449 développé par la demanderesse pour les tôles destinées aux extrados de voilure sont étudiées dans la communication de T. Warner et al. « Aluminium alloy developments for affordable airframe structures »,
30 Conference on Synthesis, Processing and Modelling of Advanced Materials, ASM International, Paris, 25-27 juin 1997, pp.77-88. La figure 2 de l'article, reproduite comme figure 1 ci-après, représente les propriétés typiques de tôles d'épaisseur comprise entre 15 et 40 mm en cet alliage, à savoir la résistance à la rupture et la

limite d'élasticité sens L en traction, la limite d'élasticité en compression sens L et le seuil de corrosion sous tension (sens ST), à l'état T651 et à un état T7x51 à résistance à la corrosion amélioré. Cet état a été identifié dans des publications ultérieures des mêmes auteurs comme T7951 (ou T79511 pour les produits filés), par exemple dans la communication de F. Heymès et al. « New aluminium semi-products for airframe application », METEC Congress, Düsseldorf, juin 1999, qui reprend la même figure. La figure 1 ci-après montre que la limite d'élasticité en compression à l'état T79 est inférieure à celle à l'état T6. A cet état T7951, les tôles en 7449 présentent, par rapport au 7150 à l'état T651 utilisés habituellement pour les extrados d'ailes d'avions commerciaux, un gain de 10% en limite d'élasticité en compression, une résistance améliorée à la corrosion feuilletante et sous tension et à la fatigue, sans diminution de la tolérance aux dommages.

En résumé, l'état de la technique montre d'une part que la résistance mécanique à la compression est une propriété essentielle pour les extrados d'ailes, et que, d'autre part les fabricants d'alliages à haute résistance proposent pour cette application des produits soit à l'état T6, correspondant au pic de limite d'élasticité en traction, soit à un état T7 sur-revenu avec une meilleure résistance à la corrosion, mais avec une perte de résistance mécanique.

Bref exposé de l'invention

L'invention a pour but d'améliorer encore la résistance mécanique en compression des produits en alliages 7000 à haute résistance destinés notamment aux extrados d'ailes d'avions sans perte sur les autres propriétés d'emploi

L'invention a pour objet un procédé de fabrication d'un produit corroyé en alliage d'aluminium Al-Zn-Mg-Cu à haute résistance mécanique, comportant :

- la coulée d'une ébauche en alliage de composition (% en poids) : Zn : 7,0 – 11,0
Mg : 1,8 – 3,0 Cu : 1,2 – 2,6 l'un au moins des éléments Mn (0,05 – 0,4), Cr (0,05 – 0,30), Zr (0,05 – 0,20), Hf (0,05 – 0,5), V (0,05 – 0,3), Ti (0,01 – 0,2) et Sc (0,05 – 0,3), reste aluminium et impuretés inévitables,
- éventuellement l'homogénéisation de cette ébauche,
- la transformation à chaud de cette ébauche par laminage, filage ou forgeage,
- la mise en solution et la trempe du produit obtenu,

- éventuellement une traction contrôlée conduisant à un allongement permanent compris entre 1 et 5 %,
- le revenu du produit à une température et d'une durée telles que le produit atteigne le pic de limite d'élasticité sens L en compression.

5

Un autre objet de l'invention est le produit laminé, filé ou forgé obtenu par ledit procédé.

- Encore un autre objet de l'invention est l'élément structural pour construction mécanique, et notamment aéronautique, fabriqué à partir d'au moins un produit laminé, filé ou forgé obtenu par ledit procédé.

Brève description des figures

- 15 La figure 1 représente les propriétés typiques, à savoir la limite élastique en traction (sens L), la résistance à la rupture en traction (sens L), la limite d'élasticité en compression (sens L) et le seuil de corrosion sous tension (sens ST), de tôles d'épaisseur comprise entre 15 et 40 mm en alliages 7150-T651, 7449-T651 et 7449-T7951 selon l'art antérieur.

- 20 La figure 2 représente le domaine temps-température du revenu du procédé selon l'invention.

La figure 3 représente la résistance à la rupture et la limite élastique en traction de tôles d'épaisseur 38 mm en alliage 7449 de l'exemple 1 en fonction du temps équivalent à 120°C du revenu pour différentes températures de revenu.

- 25 La figure 4 représente la résistance à la rupture en traction (sens L) et la limite d'élasticité en traction et en compression (sens L) de tôles de 38 mm en alliage 7449 de l'exemple 2 en fonction du temps équivalent à 120°C du revenu.

La figure 5 représente la limite d'élasticité en compression des tôles en alliages A et B de l'exemple 3 en fonction du temps équivalent à 120°C du revenu.

30

Description détaillée de l'invention

- L'invention repose sur la mise en évidence d'un décalage entre le pic de résistance mécanique en traction obtenu au revenu, qui correspond à ce qu'on nomme habituellement l'état T6, et le pic de résistance mécanique en compression. Bien qu'il soit connu depuis très longtemps que les extrados d'ailes travaillent surtout en compression, et que donc la limite d'élasticité en compression est une propriété dimensionnante pour les éléments de structure de cette partie d'aile, les métallurgistes ont toujours utilisé la résistance en traction pour définir l'état T6 de résistance maximale atteinte au revenu.
- Les inventeurs ont trouvé qu'entre les états T6 et T79 de l'art antérieur, il existait un état métallurgique pour lequel la limite d'élasticité en compression passe par un pic se situant entre 20 à 25 MPa au-dessus des limites d'élasticité en compression de ces deux états.
- Le procédé selon l'invention s'applique aux alliages du type Al-Zn-Mg-Cu à teneur élevée en zinc, comprise entre 7 et 11%, avec une teneur en magnésium comprise entre 1,8 et 3%, et de préférence entre 1,8 et 2,4%, et une teneur en cuivre entre 1,2 et 2,6% et de préférence entre 1,6 et 2,2%. Au-dessous d'une teneur en zinc de 7 %, l'invention semble présenter peu d'intérêt car on n'utilise plus en construction aéronautique de tels alliages pour la fabrication d'éléments structuraux sollicités en compression. Au-dessus d'une teneur en zinc de 11 %, on rencontre des difficultés lors de la coulée industrielle de plaques ou billettes de taille suffisamment grande pour la production de tôles, profilés ou pièces forgées aptes à la fabrication desdits éléments structuraux.
- Le procédé selon l'invention s'applique en particulier aux alliages utilisés pour la fabrication d'éléments d'extrados d'ailes d'avions, par exemple les alliages 7055, 7349 et 7449, sous forme de produits corroyés, c'est-à-dire laminés, filés ou forgés. Ce procédé comporte, de manière connue, la fabrication d'une ébauche, à savoir une plaque pour les produits laminés, une billette pour les produits filés ou un bloc de forge pour les produits forgés. Cette ébauche est, de préférence, homogénéisée à une température proche de la température de fusion commençante de l'alliage, comme indiqué dans la demande de brevet EP 0670377. Elle est ensuite transformée par laminage à chaud, filage ou forgeage, à la dimension désirée. Le produit obtenu est

mis en solution, également à une température assez proche de la température de fusion commençante de l'alliage, cette température étant contrôlée par analyse enthalpique différentielle. La mise en solution est suivie d'une trempe, généralement à l'eau froide. Le produit trempé est soumis, de préférence, à une traction contrôlée conduisant à un allongement permanent compris entre 1 et 5%.

Le produit subit ensuite un revenu pour obtenir le pic de limite d'élasticité en compression sens L. Le revenu peut être mono-palier, c'est-à-dire comportant une rampe de montée en température, linéaire ou non en fonction du temps, un palier à température constante dans la limite de tolérance de température du four utilisé, et un refroidissement jusqu'à la température ambiante. Dans le cas d'un revenu mono-palier, le palier est à une température comprise entre 120 et 150°C, et d'une durée comprise dans le parallélogramme AEFG de la figure 2, et de préférence entre 120 et 145°C d'une durée comprise dans le parallélogramme ABCD de la figure 2. Ce dernier revenu est un mode de réalisation particulièrement préféré de la présente invention. Il peut être utilisé par exemple pour les produits en alliages 7449 et 7439. Le revenu peut également être bi-palier, avec un premier palier à une température comprise entre 80 et 120°C, et un second palier à une température plus élevée, comprise entre 120 et 160°C. Il peut également être tri-palier, avec un premier et un second palier dans les mêmes limites que le revenu bi-palier, et un troisième palier à une température plus basse que le second, comprise entre 100 et 140°C. Compte tenu du temps nécessaire, dans les fours industriels, pour les montées en température, il n'est guère envisageable d'avoir des paliers d'une durée inférieure à 2 h, et de préférence à 5 h.

Dans tous les cas, on peut ramener les deux paramètres température et durée à un paramètre unique, le temps équivalent à 120°C, défini par la formule :

$$t(eq) = \frac{\int \exp(-16000 / T) dt}{\exp(-16000 / T_{ref})}$$

dans laquelle T est la température du palier de revenu en °K, t la durée de traitement en heures et T_{ref} la température de référence prise ici à 120°C, soit 393°K. La durée du revenu est comprise entre 100 et 250 h de temps équivalent à 120°C, et de 50 à 200h de plus que le temps équivalent correspondant au revenu T651. La durée de

revenu nécessaire pour atteindre le pic en compression dépend de la composition de l'alliage, et notamment du rapport Cu/Mg, la durée nécessaire croissant avec ce rapport.

Le produit corroyé, et notamment le produit laminé, filé ou forgé obtenu par le procédé selon l'invention peut être avantageusement utilisé pour la fabrication d'éléments structuraux, notamment en construction aéronautique. Grâce à l'augmentation de la limite d'élasticité en compression qui résulte du procédé selon l'invention, un élément structural fabriqué à partir d'au moins un produit filé, laminé ou forgé selon l'invention, montre par rapport à un élément structural de même dimension et réalisé à partir de produits corroyés, filés ou forgés selon l'art antérieur une meilleure résistance lors d'une sollicitation en compression. Dans une réalisation préférée de l'invention, l'élément structural est un extradoss d'aile d'avion.

Exemples

Exemple 1

On a réalisé des tôles en alliage 7449 d'épaisseur 38 mm. La composition de l'alliage était la suivante (% en poids) : Zn = 8,11 Mg = 2,19 Cu = 1,94 Si = 0,04 Fe = 0,07 Zr = 0,09 Cr = 0,005 Ti = 0,025 reste aluminium et impuretés (< 0,05 chacune).

Les tôles ont subi un pré-élargissement pour passer d'une largeur de plaque de 1100 mm à 2500 mm, un laminage à chaud jusqu'à 38 mm avec une température de sortie à 378°C, une mise en solution à 475°C, une trempe à l'eau froide, et une traction contrôlée à 2,8% d'allongement permanent après une attente de 1 h après trempe.

Des échantillons prélevés à mi-épaisseur des tôles ont été soumis à 11 revenus différents, de type mono- ou bi-palier, mentionnés au tableau 1. Les rampes de montée et de descente entre paliers étaient respectivement de 16°C/h et 65°C/h, correspondant à des vitesses observables sur des fours industriels de traitement thermique. Pour chaque revenu, on a calculé le temps équivalent à 120°C t_{eq} selon la formule :

$$t(eq) = \frac{\int \exp(-16000 / T) dt}{\exp(-16000 / T_{ref})}$$

dans laquelle T est la température du palier de revenu en °K, t la durée de traitement en heures et T_{ref} la température de référence prise ici à 120°C, soit 393°K.

- 5 Les 11 revenus essayés sont compris entre le revenu T651 et le revenu T7951 de l'art antérieur, et leurs paramètres, ainsi que les temps équivalents correspondants, sont indiqués au tableau 1.

On a mesuré dans chaque cas les caractéristiques statiques en traction dans le sens L (résistance à la rupture R_m, limite d'élasticité R_{0,2} et allongement A) sur des
10 éprouvettes TOR 6 prélevées à cœur des tôles. Les résultats sont la moyenne d'au moins deux mesures ; ils sont indiqués au tableau 1, ainsi que sur la figure 3.

Tableau 1

Revenu 1 ^{er} palier	Revenu 2 ^{ème} palier	Teq à 120°C (h)	R _{0,2(L)} (Mpa)	R _{m(L)} (Mpa)	A (%)
24h-120°C		24	617	661	12
48h-120°C		48	623	661	12
96h-120°C		96	624	655	12
6h-135°C		29	616	655	12
12h-135°C		55	619	651	11
24h-135°C		108	619	651	11
48h-135°C		215	611	642	11
24h-120°C	5h-150°C	125	620	649	11
24h-120°C	9h-150°C	196	613	642	11
24h-120°C	13h-150°C	265	607	636	10
24h-120°C	17h-150°C	336	595	627	10

15

On constate qu'au voisinage du pic, ce sont les revenus à plus basse température, c'est-à-dire à 120°C, qui conduisent aux valeurs de R_{0,2} et R_m les plus élevées. En ce qui concerne les revenus bi-palier, c'est la température du second palier qui est déterminante pour cet effet. Par ailleurs, les pics pour R_{0,2} et R_m sont voisins, mais

pas exactement au même endroit. On peut définir le traitement T651 au pic comme le traitement permettant de s'approcher de la valeur maximum potentielle de $R_{0,2}$ et de R_m à moins de 5 MPa près, tout en restant industriellement acceptable. Dans le cas présent, il s'agit du traitement de 48 h à 120°C.

5

Exemple 2

On a réalisé, de la même manière que dans l'exemple 1, des échantillons prélevés dans des tôles de 38 mm d'épaisseur en alliage 7449 de composition : Zn = 8,38

10 Mg = 2,15 Cu = 1,96 Si = 0,04 Fe = 0,06 Zr = 0,11 reste aluminium et impuretés (< 0,5% chacune).

Ces échantillons sont soumis à 8 revenus différents, compris entre le revenu T651 défini à l'exemple 1 et le revenu T7951. Les températures et durées de ces 8 revenus, ainsi que les temps équivalents à 120°C correspondants, sont indiqués au tableau 2.

15

Tableau 2

Revenu	Paramètres	Temps équivalent
A (T651)	48h-120°C	48
B	12h-135°C	48
C	18h-135°C	78
D	24h-135°C	102
E	30h-135°C	130
F	24h-120°C + 5,5h-150°C	130
G	24h-120°C + 11h-150°C	222
H (T7951)	24h-120°C + 17h-150°C	321

20

En plus des caractéristiques mécaniques de traction, on a mesuré la limite d'élasticité en compression dans le sens L sur des éprouvettes de diamètre 13 mm et de longueur 25 mm, ainsi que la conductivité électrique sur des échantillons prélevés en surface. Les résultats, moyennes de deux mesures, sont indiqués au tableau 3, et sur la figure 4 pour R_m et $R_{0,2}$ en traction, et $R_{0,2}$ en compression.

9
Tableau 3

Revenu	R _m trac. (MPa)	R _{0,2} trac. (MPa)	A (%)	R _{0,2} comp(MPa)	Conduct. (MS/m)
A	638	676	12,4	596	18,4
B	639	673	11,8	599	18,7
C	637	668	12,0	611	19,1
D	634	663	11,0	614	19,7
E	633	663	10,5	615	20,0
F	635	662	11,2	613	20,1
G	619	648	10,5	608	21,2
H	597	621	10,7	590	21,9

On constate que le revenu conduisant au pic de limite d'élasticité en compression (sens L) se situe à un temps équivalent de l'ordre de 150 h, c'est-à-dire à un temps équivalent intermédiaire entre un revenu T651 et un revenu T7951. La plage intéressante se situe entre 100 et 250 h de temps équivalent à 120°C, soit 50 à 200 h de plus que celui du revenu T651. Ce revenu au pic en compression conduit à un gain de 19 MPa par rapport au revenu T651 et de 25 MPa par rapport au revenu T7951.

Exemple 3

On a fabriqué, de la même manière que dans les exemples précédents jusqu'à la trempe, des tôles en deux alliages 7449 dont les épaisseurs et les compositions sont indiquées au tableau 4.

Tableau 4

Alliage	e (mm)	Si	Fe	Cu	Mg	Zn	Zr	Ti
A	30	0,049	0,075	1,87	2,35	8,38	0,11	0,03
B	23	0,045	0,068	1,95	2,27	8,31	0,10	

On a soumis ces tôles à différents revenus indiqués au tableau 5, les 11 premiers correspondant à l'alliage A et les 7 derniers à l'alliage B. On a mesuré sur des

éprouvettes de diamètre 13 mm et de longueur 25 mm, prélevées à cœur des tôles, la limite d'élasticité $R_{0,2}$ en compression sens L, ainsi que le module d'élasticité en compression, également sens L. Les résultats sont indiqués au tableau 5 et reportés, pour la limite d'élasticité, sur la figure 5 en fonction du temps équivalent à 120°C du

5 revenu.

Tableau 5

Revenu 1 ^{er} palier	Revenu 2 ^{ème} palier	Revenu 3 ^{ème} palier	R _{0,2} compr. (MPa)	Module (MPa)
24h-80°C	24h-135°C		605	70281
24h-100°C	24h-135°C		602	71200
24h-120°C	24h-135°C		607	72335
24h-100°C	18h-140°C		603	70598
24h-100°C	7h-150°C		601	70618
24h-100°C	2,5h-160°C		607	72302
24h-100°C	30h-140°C		600	72806
24h-100°C	18h-140°C	24h-120°C	616	71621
24h-100°C	7h-150°C	24h-120°C	615	70862
24h-100°C	2,5h-160°C	24h-120°C	622	72569
T7951			587	
24h-80°C	24h-135°C		635	72910
24h-120°C	24h-135°C		611	72222
24h-100°C	18h-140°C		614	73244
24h-100°C	7h-150°C		610	72349
24h-100°C	30h-140°C		596	70181
24h-100°C	7h-150°C	24h-120°C	621	71303
T7951			598	

- 10 On constate que le pic de limite d'élasticité en compression se situe pour un temps équivalent à 120°C compris entre 100 et 200 h, et que les revenus tri-palier conduisent à des valeurs plus élevées. Par ailleurs, on note par rapport au revenu

Ref.	Material	Temperature (K)	Frequency (Hz)	Modulus (GPa)	Loss Modulus (GPa)	Phase Angle (°)	Storage Modulus (GPa)	Loss Modulus (GPa)	Phase Angle (°)
[1]	Aluminum	293	1000	70	0.001	0.001	70	0.001	0.001
[2]	Steel	293	1000	200	0.001	0.001	200	0.001	0.001
[3]	Carbon Fiber	293	1000	150	0.001	0.001	150	0.001	0.001
[4]	Kevlar	293	1000	100	0.001	0.001	100	0.001	0.001
[5]	Fiberglass	293	1000	50	0.001	0.001	50	0.001	0.001
[6]	Concrete	293	1000	30	0.001	0.001	30	0.001	0.001
[7]	Brick	293	1000	10	0.001	0.001	10	0.001	0.001
[8]	Marble	293	1000	5	0.001	0.001	5	0.001	0.001
[9]	Granite	293	1000	3	0.001	0.001	3	0.001	0.001
[10]	Sandstone	293	1000	1	0.001	0.001	1	0.001	0.001
[11]	Clay	293	1000	0.5	0.001	0.001	0.5	0.001	0.001
[12]	Wood	293	1000	0.1	0.001	0.001	0.1	0.001	0.001
[13]	Polymers	293	1000	0.01	0.001	0.001	0.01	0.001	0.001
[14]	Composites	293	1000	100	0.001	0.001	100	0.001	0.001
[15]	Metals	293	1000	100	0.001	0.001	100	0.001	0.001
[16]	Aluminum	293	1000	70	0.001	0.001	70	0.001	0.001
[17]	Steel	293	1000	200	0.001	0.001	200	0.001	0.001
[18]	Carbon Fiber	293	1000	150	0.001	0.001	150	0.001	0.001
[19]	Kevlar	293	1000	100	0.001	0.001	100	0.001	0.001
[20]	Fiberglass	293	1000	50	0.001	0.001	50	0.001	0.001
[21]	Concrete	293	1000	30	0.001	0.001	30	0.001	0.001
[22]	Brick	293	1000	10	0.001	0.001	10	0.001	0.001
[23]	Marble	293	1000	5	0.001	0.001	5	0.001	0.001
[24]	Granite	293	1000	3	0.001	0.001	3	0.001	0.001
[25]	Sandstone	293	1000	1	0.001	0.001	1	0.001	0.001
[26]	Clay	293	1000	0.5	0.001	0.001	0.5	0.001	0.001
[27]	Wood	293	1000	0.1	0.001	0.001	0.1	0.001	0.001
[28]	Polymers	293	1000	0.01	0.001	0.001	0.01	0.001	0.001
[29]	Composites	293	1000	100	0.001	0.001	100	0.001	0.001
[30]	Metals	293	1000	100	0.001	0.001	100	0.001	0.001

Revendications

- 5 1. Procédé de fabrication d'un produit corroyé en alliage d'aluminium Al-Zn-Mg-Cu à haute résistance mécanique, comportant :
 - la coulée d'une ébauche en alliage de composition (% en poids) : Zn : 7,0 – 11,0 Mg : 1,8 – 3,0 Cu : 1,2 – 2,6 l'un au moins des éléments Mn (0,05 – 0,4), Cr (0,05 – 0,3), Zr (0,05 – 0,20), Hf (0,05 – 0,5), V (0,05 – 0,3), Ti (0,01 – 0,2) et Sc (0,05 – 0,3), reste aluminium et impuretés inévitables,
 - 10 - éventuellement l'homogénéisation de cette ébauche,
 - la transformation à chaud de cette ébauche par laminage, filage ou forgeage,
 - la mise en solution et la trempe du produit obtenu,
 - éventuellement une traction contrôlée conduisant à un allongement
 - 15 permanent compris entre 1 et 5 %,
 - le revenu du produit à une température et d'une durée telles que le produit atteigne le pic de limite d'élasticité sens L en compression.
- 20 2. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que la teneur en magnésium de l'alliage est comprise entre 1,8 et 2,4%.
3. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que la teneur en cuivre de l'alliage est comprise entre 1,6 et 2,2%.
- 25 4. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que la teneur en magnésium de l'alliage est comprise entre 1,8 et 2,4 %, et la teneur en cuivre est comprise entre 1,6 et 2,2 %.
5. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que l'alliage est le 7349 ou
- 30 le 7449.
6. Procédé selon la de revendication 1, caractérisé en ce que l'alliage est le 7055.

7. Procédé de fabrication d'un produit corroyé en alliage d'aluminium Al-Zn-Mg-Cu à haute résistance mécanique, comportant :

- la coulée d'une ébauche en alliage de composition (% en poids) : Zn : 7,0 – 11,0
Mg : 1,8 – 3,0 Cu : 1,2 – 2,6 l'un au moins des éléments Mn (0,05 – 0,4),
5 Cr (0,05 – 0,3), Zr (0,05 – 0,20), Hf (0,05 – 0,5), V (0,05 – 0,3), Ti (0,01 – 0,2) et
Sc (0,05 – 0,3), reste aluminium et impuretés inévitables,

- éventuellement l'homogénéisation de cette ébauche,
- la transformation à chaud de cette ébauche par laminage, filage ou forgeage,
- la mise en solution et la trempe du produit obtenu,

10 - éventuellement une traction contrôlée conduisant à un allongement permanent compris entre 1 et 5 %,
- un revenu mono-palier à une température et une durée comprises dans le parallélogramme AEFG dont les sommets ont, dans un diagramme température -durée, les coordonnées suivantes :

15 A : 120°C – 100 h E : 150°C – 5 h F : 150°C – 40 h G : 120°C – 700 h.

8. Procédé selon la revendications 7, caractérisé en ce que le revenu est un revenu mono-palier à une température et une durée comprises dans le parallélogramme ABCD dont les sommets ont, dans un diagramme température – durée, les
20 coordonnées suivantes :

A : 120°C – 100 h B : 145°C – 9 h C : 145°C – 22 h D : 120°C – 230 h

9. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que le revenu a une durée en temps équivalent à 120°C comprise entre 100 et 250 h.

10. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que le revenu a une durée en temps équivalent à 120°C supérieure de 50 à 200 h à celle correspondant à l'état T651.

11. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que le revenu est un revenu bi-palier, comportant

un premier palier à une température comprise entre 80 °C et 120 °C, et
un second palier à une température comprise entre 120 °C et 160 °C,

et en ce que le revenu a une durée en temps équivalent à 120°C comprise entre 100 et 250 h.

12. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que le revenu est un revenu tri-palier, comportant
- un premier palier à une température comprise entre 80 °C et 120 °C,
 un second palier à une température comprise entre 120 °C et 160 °C, et
 un troisième palier à une température plus basse que le second et comprise entre 100 °C et 140 °C,
- et caractérisé en ce que le revenu a une durée en temps équivalent à 120°C comprise entre 100 et 250 h.

13. Élément structural pour construction mécanique et notamment aéronautique, fabriqué à partir d'au moins un produit laminé, filé ou forgé obtenu par le procédé selon la revendication 1.

14. Élément structural pour construction mécanique et notamment aéronautique, fabriqué à partir d'au moins un produit laminé, filé ou forgé obtenu par le procédé selon la revendication 2

15. Élément structural pour construction mécanique et notamment aéronautique, fabriqué à partir d'au moins un produit laminé, filé ou forgé obtenu par le procédé selon la revendication 3.

16. Élément structural pour construction mécanique et notamment aéronautique, fabriqué à partir d'au moins un produit laminé, filé ou forgé obtenu par le procédé selon la revendication 4.

17. Élément structural pour construction mécanique et notamment aéronautique, fabriqué à partir d'au moins un produit laminé, filé ou forgé obtenu par le procédé selon la revendication 5.

18. Élément structural pour construction mécanique et notamment aéronautique, fabriqué à partir d'au moins un produit laminé, filé ou forgé obtenu par le procédé selon la revendication 6.
19. Élément structural pour construction mécanique et notamment aéronautique, fabriqué à partir d'au moins un produit laminé, filé ou forgé obtenu par le procédé selon la revendication 7.
20. Élément structural pour construction mécanique et notamment aéronautique, fabriqué à partir d'au moins un produit laminé, filé ou forgé obtenu par le procédé selon la revendication 8.
21. Élément structural pour construction mécanique et notamment aéronautique, fabriqué à partir d'au moins un produit laminé, filé ou forgé obtenu par le procédé selon la revendication 9.
22. Élément structural pour construction mécanique et notamment aéronautique, fabriqué à partir d'au moins un produit laminé, filé ou forgé obtenu par le procédé selon la revendication 10.
23. Élément structural pour construction mécanique et notamment aéronautique, fabriqué à partir d'au moins un produit laminé, filé ou forgé obtenu par le procédé selon la revendication 11.
24. Élément structural pour construction mécanique et notamment aéronautique, fabriqué à partir d'au moins un produit laminé, filé ou forgé obtenu par le procédé selon la revendication 12.

Abrégé

- 5 L'invention a pour objet un procédé de fabrication d'un produit corroyé en alliage d'aluminium Al-Zn-Mg-Cu à haute résistance mécanique, comportant :
- la coulée d'une ébauche en alliage de composition (% en poids) : Zn : 9,0 – 11,0 Mg : 1,8 – 3,0 Cu : 1,2 – 2,6 l'un au moins des éléments Mn (0,05 – 0,4), Cr (0,05 – 0,30), Zr (0,05 – 0,20), Hf (0,05 – 0,5), V (0,05 – 0,3), Ti (0,01 – 0,2) et Sc (0,05 – 0,3), reste aluminium et impuretés inévitables,
 - 10 - éventuellement l'homogénéisation de cette ébauche,
 - la transformation à chaud de cette ébauche par laminage, filage ou forgeage,
 - la mise en solution et la trempe du produit obtenu,
 - éventuellement une traction contrôlée conduisant à un allongement permanent
 - 15 compris entre 1 et 5 %,
 - le revenu du produit à une température et d'une durée telles que le produit atteigne le pic de limite d'élasticité sens L en compression.

L'invention s'applique en particulier aux éléments d'extrados d'ailes d'avion.